

Noora Luukkala

# LASKENTATYÖKALUN SUUNNITTELU ILMANVAIHTOKONEEN ENERGIA- HOKKUUDEN JA – TALOUDEN TAR- KASTELUUN

Opinnäytetyö  
Energiatekniikka

2018



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Noora Luukkala	Insinööri (AMK)	Huhtikuu 2018
<b>Opinnäytetyön nimi</b>  Laskentatyökalun suunnittelu ilmanvaihtokoneen energiatehokkuuden ja -talouden tarkasteluun		37 sivua 5 liitesivua
<b>Toimeksiantaja</b>  AdConSys Oy		
<b>Ohjaaja</b>  Hannu Sarvelainen, lehtori		
<b>Tiivistelmä</b>  <p>Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kiinteistön ilmanvaihtoa, ilmanvaihtokoneen toimintaperiaatetta yleisesti sekä ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutusta ja energiatehokkuutta. Tämän työn tavoitteena on selvittää ilmanvaihtokoneen energiankulutus ja luoda Excel-pohjainen laskentatyökalu, jonka avulla ilmanvaihtokoneen energiatehokkuutta ja -taloutta voidaan arvioida.</p> <p>Tässä työssä esitellään erilaisia menetelmiä kiinteistön ilmanvaihdon toteuttamiseen ja arvioidaan niiden hyviä ja huonoja ominaisuuksia. Ilmanvaihdon tarvetta arvioidaan hyvän sisäilman ominaisuuksien, vaatimusten ja raja-arvojen perusteella. Ilmanvaihtokoneen toimintaperiaate esitetään. Toiminnan lisäksi ilmanvaihtokoneen merkittävimmät osat ja niiden ominaisuudet selvitetään. Työssä perehdytään erityisesti lämmön talteenottojärjestelmien erilaisiin vaihtoehtoihin sekä näiden erityispiirteisiin.</p> <p>Kohdekiinteistön ilmanvaihtokoneiden energian kulutus lasketaan. Laskennassa eritellään ilmanvaihtokoneen eri osat sekä sähköenergian ja lämpöenergian kulutus. Tämän lisäksi työssä selvitetään ilmanvaihtoon liittyviä energiatehokkuustoimenpiteitä ilman laadusta tinkimättä. Tässä työssä tarkastellaan ilmanvaihtokoneen merkittävimpien osien osuutta energiankulutukseen.</p> <p>Energiankulutuslaskennan avulla muodostetaan yhtälöt hyötysuhteen ja jälkilämmitystehon tarpeelle ulkolämpötilan funktiona. Näitä yhtälöitä hyödyntäen luotiin Excel-pohjainen laskentatyökalu. Laskentatyökalu arvioi ilmanvaihtokoneen hyötysuhdetta, hyötysuhteen hälytysrajaa, jälkilämmitystehon tarvetta ja kustannuksia ulkolämpötilan suhteen. Laskennassa huomattiin ilmanvaihtokoneen käyttävän huomattavan määrän sähköenergiaa. Sähköenergian kulutuksen vähentämiseksi esitetään muutamia tehostamistoimenpiteitä. Tehostamistoimenpiteillä pyritään asettamaan ilmanvaihto tarvetta vastaavaksi. Pienillä muutoksilla voidaan saavuttaa vuodessa merkittäviä säästöjä.</p>		
<b>Asiasanat</b>  Energialaous, energiatehokkuus, ilmanvaihto		

Author (authors)	Degree	Time
Noora Luukkala	Bachelor of Engineering	April 2018
<b>Thesis Title</b>		
Designing of a calculation tool for examination of energy efficiency and energy economy of the ventilation equipment		37 pages 5 pages of appendices
<b>Commissioned by</b>		
Adconsys Oy		
<b>Supervisor</b>		
Hannu Sarvelainen, Senior Lecturer		
<b>Abstract</b>		
<p>The objective of this thesis was to design a calculation tool for examination of energy efficiency and energy economy of real estate ventilation equipment. The thesis also examined the energy consumption of the ventilation equipment. The objective of calculation tool was to show energy consumption and its financial value. The calculation tool was designed to elucidate the consumption of energy and to help AdConSys Oy to marketing their energy optimisation of air ventilation control systems.</p> <p>The thesis introduces the basics of ventilation equipment principle. The properties of gravitational and mechanical ventilation are defined. Indoor climate affecting determinants are examined. Their effects on different levels of quality of indoor climate are presented.</p> <p>Two example ventilation equipment systems were examined in this thesis. Air ventilation systems were monitored at online control system. Operation values were listed in excel tables. The figures made by gathered values and functions for heat regenerator's efficiency and need of re-heating were made by tables. Heat energy consumption was calculated in different outside temperatures. Electricity consumption of the fans and pumps of the air ventilation system was calculated.</p> <p>According the calculations, pumps and fans were consuming relatively lot of energy. High energy consumption was related to poor optimisation of air ventilation system. The best energy efficiency would be gained by optimising the system to work on minimal power when the indoor climate usage is low. It is possible to improve energy efficiency by optimising the area of working outside temperatures where ventilation system is using reheat or cooling pump.</p> <p>A calculation tool was made for examination of energy efficiency and energy economy of air ventilation system. The calculation tool determines an efficiency of reheating generator, the alarm limit of the efficiency, the need of re-heat power and the cost of re-heating.</p>		
<b>Keywords</b>		
Energy economy, energy efficiency, ventilation equipment		

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	ILMANVAIHTO .....	6
2.1	Toimintaperiaate .....	7
2.2	Sisäilmasto .....	9
3	ILMANVAIHTOKONE .....	12
3.1	Lämmön talteenotto .....	12
3.2	Puhaltimet.....	17
3.3	Jälkilämmityspatteri .....	18
3.4	Jäähdytyspatteri.....	18
3.5	Ilman kostutin.....	19
4	ILMANVAIHDON ENERGIAATEHOKKUUS .....	20
4.1	Puhaltimet.....	20
4.2	Lämmön talteenotto .....	21
4.3	Automaatiojärjestelmä .....	21
4.4	Muut energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät .....	23
5	LASKENTATYÖKALUN SUUNNITTELU.....	23
5.1	Kohteen tiedot.....	24
5.2	Laskennan tavoitteet.....	24
6	LASKENTA.....	24
6.1	Puhaltimien energian kulutus .....	24
6.2	Jälkilämmityspatterin energian kulutus .....	25
6.3	Jäähdytyksen energian kulutus.....	29
6.4	Ilmanvaihtokoneen kokonaisenergiankulutus .....	29
6.5	Laskentatyökalu.....	30
7	LASKENNAN ANALYSOINTI .....	31
8	TULOSTEN TARKASTELU .....	32
9	YHTEENVETO .....	33

LÄHTEET.....	35
--------------	----

## KUVALUETTELO

## LIITTEET

Liite 1. Lämpötilojen pysyvyystiheydet

Liite 2. Lämpötilojen pysyvyystiheydet tunteina

Liite 3. Ohjeita laskentatyökalun käyttöön ja ohjelmointiin

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella laskentatyökalu Adconsys Oy:n asiakkaan kiinteistön ilmanvaihtokoneen energiatehokkuuden ja – talouden tarkasteluun. Tässä työssä selvitetään ilmanvaihtokoneen toimintaperiaate ja ilmanvaihtokoneen energiankulutus yleisesti. Lisäksi työssä tarkastellaan ilmanvaihtokoneen energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä sekä niiden vaikutuksia ilmanvaihtokoneen energiatalouteen. Laskentatyökalun suunnittelun tukena käytetään kahta esimerkki-ilmanvaihtokonetta.

Laskentatyökalun avulla AdConSys Oy pyrkii tarjoamaan asiakkaalleen havainnollisempaa tietoa ilmanvaihtokoneen kulutuksesta. Laskentatyökalu laskee ja ilmoittaa kulutetun energian ja energiamäärän hinnan. Näin pyritään motivoimaan asiakasyrityksiä energiatehokkaampaan ilmanvaihtoon.

Työn toimeksiantaja AdConSys Oy on kustomoituja rakennusautomaatio ratkaisuja tarjoava yritys. Rakennusautomaatiojärjestelmillä pyritään minimoimaan kiinteistön elinkaarikustannuksia sekä tehostamaan energian käyttöä. AdConSys Oy:n toimipisteet sijaitsevat Järvenpäässä, Kotkassa, Lappeenrannassa ja Tampereella.

## 2 ILMANVAIHTO

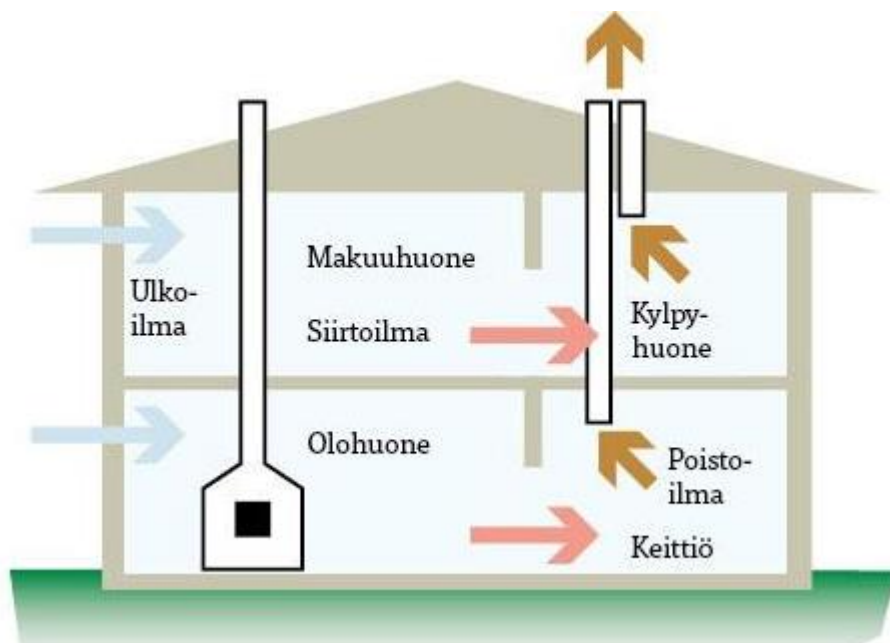
Ilmanvaihdolla tarkoitetaan puhtaan ilman siirtämistä sisätiloihin ja epäpuhtaan ilman poistamista kiinteistöstä (Hyvä ilmanvaihto 2017). Hyvän sisäilman merkittävimmät tekijät ovat lämpötila, kosteus ja ilman laatu. Ilman laadun merkittävimpiä ominaisuuksia ovat riittävä happipitoisuus, hajuttomuus ja vähäiset epäpuhtauspitoisuudet. Ilmanvaihto voidaan toteuttaa koneellisesti tai painovoimaa hyödyntäen. (Seppänen 1996, 3.)

Ilmanvaihdon tavoitteena on ylläpitää viihtyisä sisäilma. Sisäilmaan päätyvät epäpuhtaudet johdetaan ulos ja tilalle puhalletaan raitista ulkoilmaa. Useimmiten raitisilma johdetaan oleskelutiloihin ja poistetaan likaisista tiloista kuten esimerkiksi WC:stä. Ilmanvaihdon tarve määräytyy kiinteistön käyttötarkoituksesta. Ilmanvaihdon tarpeeseen vaikuttavat kiinteistön rakenteet, prosessit ja ihmiset. (Korkala ym. 2012.)

## 2.1 Toimintaperiaate

Ilmanvaihdossa ilmamassoja siirretään laadukkaan sisäilman ylläpitämiseksi. Ilmamassojen siirtyminen perustuu paine-eroon. (Ilmanvaihto, 2017.) Paine-ero saavutetaan koneellisessa ilmanvaihdossa puhaltimilla ja luonnollisessa ilmanvaihdossa painovoiman ja sääolosuhteiden ansioista.

Yksinkertaisimmillaan ilmanvaihto voidaan toteuttaa ilman koneellista käyttövoimaa. Tällöin kyseessä on painovoimainen ilmanvaihto. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa ilman liike perustuu ilman tiheyseroihin. Luonnostaan lämmin ilma on viileää ilmaa kevyempää. Muut sääolosuhteet esimerkiksi tuuli tehostaa painovoimaista ilmanvaihtoa. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa raitis ulkoilma tulee sisätiloihin korvausilmaventtiileistä ja kanavistosta koostuvista horneista. Ilman liikkeet ovat esitetty kuvassa 1. Kiinteistö, jossa on käytössä painovoimainen ilmanvaihto, vaatii sisäilmanlaadun seuraamista kiinteistön hoitajalta, jotta se säilyy riittävän hyvänä. Etenkin talvisaikaan sisäilman lämpötilaa tulee tarkkailla. (Ketola 2014.)

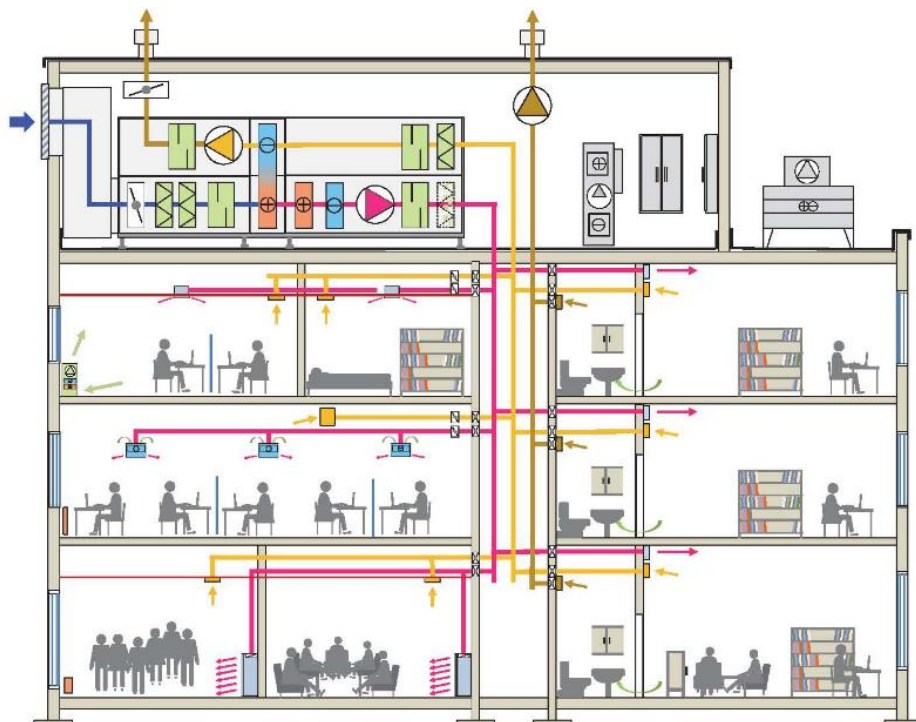


**Kuva 1.** Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä.  
(<https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/ilmanvaihto/ilmanvaihtojarjestelmat>)

Painovoimaista ilmanvaihtoa voidaan tehostaa koneellisella poistoilmalla, jolloin täytyy huomioida riittävä korvausilman saanti. Koneellisella poistoilmavaihdolla tarkoitetaan useimmiten painovoimaista ilmanvaihtoa, jota on tehos-

tettu poistoilmapuhaltimilla. Poistoilmapuhallin voi olla esimerkiksi keittiön liesituuletin. Kun kiinteistöstä puhalletaan ilmaa pois, syntyy kiinteistöön alipaine ilman hallittua korvausilman saantia. Jos kiinteistö on voimakkaasti alipaineistettu, alkaa se imeä ilmaa. Voimakkaan alipaineen aikana korvausilman saanti ei välttämättä ole hallittua. Tällöin rakennus voi imeä korvausilmaa rakenteidensa läpi tai jopa viemäristä. Näin kiinteistöön päätyy epäpuhdasta ilmaa. (Tekeville 2018.)

Koneellisessa ilmanvaihdossa puhaltimet saavat aikaan paine-eron, mikä aiheuttaa ilman liikettä. Koneellisessa ilmanvaihdossa huoneilma vaihdetaan hallitusti koko kiinteistössä. Puhaltimilla säädellään sisään tulevaa tuloilmaa sekä ulos johdettua jäteilmaa, jolloin voidaan säätää ilmanvaihto tarvetta vastaavaksi. Koneellisissa ilmanvaihtojärjestelmissä tuloilma kulkee useiden säleiköiden ja suodattimien läpi ja näin sisätiloihin puhallettava ilma on ulkoilmaa puhtaampaa. Koneellisen ilmanvaihdon toiminta on esitetty kuvassa 2. Puh- taamman sisäilman lisäksi koneellinen ilmanvaihto on painovoimaista ilmanvaihtoa energiatehokkaampaa. Koneellisessa ilmanvaihtojärjestelmässä poistoilman sisältämä lämpöenergia voidaan ottaa talteen ja sitä voidaan käyttää tuloilman lämmittämiseen lämmön talteenottolaitteen avulla. Jos tuloilma ei ole riittävän lämmintä lämmön talteenottolaitteen jälkeen, voidaan sitä vielä lämmittää erillisellä jälkilämmityspatterilla. (Korkala ym. 2012, 87-97.)



**Kuva 2.** Koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä. (<https://www.sisailmauutiset.fi/tutkimus/ilmanvaihdon-ja-ilmastoinnin-suunnitteluun/>)



## 2.2 Sisäilmasto

Sisäilmastolla tarkoitetaan sisätiloissa vallitsevaa ilmastoja. Sisäilmasto koostuu monista eri ominaisuuksista kuten fysikaalisista, kemiallisista ja biologisista tekijöistä. Merkittäviä ominaisuuksia ovat lämpöolosuhteet, ilmanlaatu, akustinen ympäristö, säteilyolosuhteet ja valaistus. (The indoor climate is important for health, well-being and productive work. 2014.)

### Lämpöolosuhteet

Sisäilman lämpötila vaikuttaa ihmisen henkiseen ja fyysiseen suoriutumiskykyyn. Liian korkea lämpötila laskee ihmisen suoriutumiskykyä. Korkeaa sisäilman lämpötilaa voidaan verrata rasittavuudeltaan jopa fyysisen työn tekemiseen. Rasittavuuden lisäksi korkea lämpötila aiheuttaa terveydellisiä haittoja, kuten lämpöuupumista. Korkea huoneilman lämpötila rasittaa myös kiinteistön rakenteita ja lisää ilmaan epäpuhtauksia rakennusmateriaaleista. Myös liian alhainen sisäilman lämpötila voi aiheuttaa terveyshaittoja ja vähentää viihtyvyyttä. (Seppänen ym. 1996, 11-18.)

Huonetilan lämpötila ja lämmityksen tarve määräytyy huoneistossa olevien ihmisten, laitteiden ja prosessien perusteella. Useimmiten talviajan sisälämpötilan oleskeluvyöhykkeen mitoituslämpötilana käytetään 21 astetta ja kesäajan mitoituslämpötilana 23 astetta. (Ympäristöministeriö 2010.)

Lämpötilan lisäksi lämpötilaerot vaikuttavat viihtyvyyteen. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö tasaantuu aina samassa tilassa, tällöin lämpimämpi esine luovuttaa lämpöenergiaa viileämmälle esineelle (Napari ym. 2013). Näin ollen ihminen luovuttaa lämpöä huoneilmaan. Ihminen luovuttaa lämpöä johtumalla, säteilemällä ja konvektiona ilmaan. Epätasainen lämmön luovutus aistitaan epämiellyttävänä. (Seppänen ym. 1996, 16.)

Johtuminen on molekyylien liikehdintää kappaleessa. Kuumat molekyylit liikkuvat nopeasti ja luovuttavat lämpöä hitaammille viileämmille molekyyleille. Näin lämpö tasaantuu. Johtumista tapahtuu vain kappaleen välillä. Jos kappale-

le on kosketuksissa toiseen kappaleeseen, tapahtuu johtumista myös näiden välillä. (Machine Design 2015.)

Lämpösäteilyllä tarkoitetaan sähkömagneettipohjaista säteilyä. Sähkömagneettinen säteily on latautuneiden elektronien ja protonien liikettä. Lämpösäteilyä tulee kaikkialta. Mitä kuumempi kappale on, sitä voimakkaampaa lämpösäteilyä se aiheuttaa. Lämpösäteily on aina säteilyn lähteestä pois päin. (Machine Design 2015.)

Konvektiolla tarkoitetaan kaasun tai nesteen kuljettamaa lämpöä. Jokin tietty-  
kaasu esimerkiksi ilma lämpenee ja sen jälkeen tämä aine liikkuu. Lämmennyt aine varastoi lämmön ja kuljettaa lämpöenergiaa mukanaan. (Machine Design 2015.)

Ilman liike aiheuttaa nopeaa lämmön siirtoa iholla. Tämä aiheuttaa vedon tunteen. Veto johtuu useimmiten voimakkaasta lämpösäteilystä tai nopeasta il-  
mavirrasta. Voimakas lämpösäteily havaitaan esimerkiksi suuren patterito-  
man ikkunan läheisyydessä. Ilmavirran aiheuttama veto johtuu ilmanvaihdon  
tuloilman liian suuresta nopeudesta tai viileästä lämpötilasta. Jos vedon tunne  
aiheutuu ilmanvaihdosta, on useimmiten ilmapelti tai tilajärjestely toteutettu  
sitte, että kylmä ilma pääsee oleskeluvyöhykkeelle liian aikaisin. (Seppänen  
1996, 20-22.)

## **Kosteus**

Ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa ilman laatuun sekä ihmisen viihtyvyyteen. Suomessa kuiva sisäilma on ongelmana etenkin lämmityskauden aikana. Ih-  
minen aistii kuivan sisäilman epämiellyttävänä. Eniten terveydellisiä haittoja  
kuiva sisäilma aiheuttaa herkille ja allergikoille. Kuiva sisäilma aistitaan iholla  
ja hengityselimistöissä. Sisäilman kuivuus lisää staattista sähköisyyttä ja pöly-  
syyttä. (Seppänen ym. 1996, 22-25.)

Kostea ilma koetaan mielekkäämpänä ja myös ihmisen hengitysteiden puhdis-  
tuskyky on parempi kosteassa ilmassa. Korkea ilman kosteus lisää ilman epä-  
puhtauksien määrää. Kostea ilma luo paremmat elinolosuhteet homeille, sie-

nille ja muille mikrobeille. (Seppänen 1996, 24.) Korkea kosteus lisää myös rakennusvaurioiden riskiä (Seppänen ym. 1996, 23).

## **Epäpuhtaudet**

Sisäilmaston epäpuhtaudet ovat ihmiselle haitallisia. Epäpuhtaudet ovat useimmiten peräisin ihmisestä, ihmisen toiminnasta, rakennus- ja sisustusmateriaaleista ja ulkoilmasta. Tyypillisin ihmisen aiheuttama epäpuhtaus on hiilidioksidi, jota syntyy jatkuvasti ihmisen uloshengityksen seurauksena. Muita epäpuhtauksia ovat esimerkiksi leijuvat pölyt, tupakan savu, radon, asbesti ja homeet. (Seppänen ym. 1996, 25-37.)

Epäpuhtauksien määrään sisäilmastossa voidaan vaikuttaa omalla toiminnalla, ulkoilman suodattamisella ja riittävällä ilmanvaihdoilla. Leijuvaa pölyä voidaan vähentää valitsemalla vähän pölyäviä sisustusmateriaaleja ja huolehtia riittävästä sisätilojen siisteydestä (Hengitysliitto s.a.).

## **Akustinen ympäristö**

Sisäilmaston äänitasot ovat helposti ja merkittävästi viihtyvyyteen vaikuttava tekijä. Ilmanvaihtoa suunniteltaessa ja rakennettaessa on kiinnitettävä huomiota ääniolosuhteisiin, sillä ilmanvaihto aiheuttaa helposti melua. Äänen teho, äänen taajuus, kesto, impulssimaisuus ja huoneen akustiikka vaikuttavat melun häiritsevyyteen. (Seppänen 1996, 3.)

## **Säteilyolosuhteet**

Säteilyolosuhteilla tarkoitetaan sisäilmastossa havaittavaa säteilyä. Sisäilmassa esiintyviä säteilyjä voivat olla esimerkiksi ultraviolettisäteily, alfasäteily, näkyvä valo ja lämpösäteily. (Seppänen 1996, 3.)

Suomessa alfasäteilyllä tarkoitetaan useimmiten radonia. Radioaktiivisen radiumin hajotessa syntyy radonia. Maaperän kiviaineessa esiintyy radiumia. Radon kulkeutuu sisäilmaan kaasumaisena, mutta muodostaa hajotessaan kiinteitä tuotteita ja alfasäteilyä. Radon on ihmiselle vaarallista, jos sitä kulkeu-

tuu keuhkoihin. Keuhkoissa tapahtuva alfasäteily vahingoittaa keuhkoja ja voi aiheuttaa keuhkosityöpää. (Seppänen ym. 1996, 28.)

## **Valaistus**

Valaistuksen viihtyvyyteen vaikuttavat valaistusvoimakkuus, värintoist ominaisuudet, häikäisy ja kontrastit. Valaistuksen tulee olla säädettävissä ja käyttötarkoitusta vastaava. (Seppänen 1996, 3.)

## **3 ILMANVAIHTOKONE**

Koneellinen ilmanvaihto voidaan jakaa tulo- ja poistoilmakoneisiin. Tuloilmakone säätelee sisään tulevaa ilmaa. Raitis ulkoilma kulkee tyypillisessä ilmanvaihtokoneessa ulkoilmasäleikön, suodattimen, lämmön talteenottolaitteen ja lämmityspatterin läpi puhaltimelle. Näiden osien lisäksi tuloilmakoneessa voi olla jäähdytyspatteri, kostutin tai muita laitteita. Tuloilmakoneen laitteisto määräytyy kohteen vaatimustason mukaan. Tuloilma kulkee omassa eristetyssä kanavassaan. Tuloilmakone puhalttaa puhtaan ilman sisätiloihin. Poistoilmakone poistaa epäpuhtaan jäteilman. Poistopuhallin siirtää käytetyn jäteilman lämmön talteenottolaitteen läpi pihalle. (Korkala ym. 2012, 87-97.)

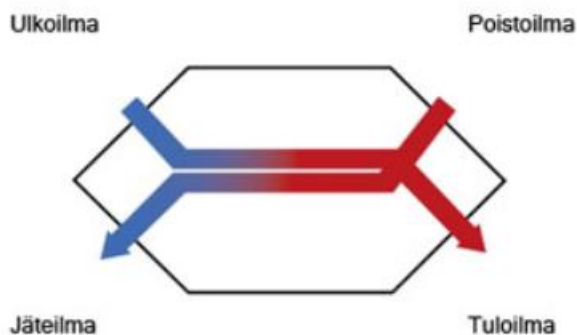
Ilmanvaihtojärjestelmää suunniteltaessa tulee huomioida kohteen käyttötarkoitus, jotta ilmanvaihto voidaan mitoittaa tarvetta vastaavaksi. Ilmanvaihto järjestelmän tulee tavallisissa sääoloissa toimia moitteettomasti ja luoda edellytykset puhtaalle, turvalliselle ja terveelliselle sisäilmastolle. (Ympäristöministeriö 2010.)

### **3.1 Lämmön talteenotto**

Lämmön talteenotolla tarkoitetaan poistoilmasta saadun lämpöenergian uusiokäyttöä. Talteen otetulla energialla esilämmitetään tuloilmaa. Lämmön talteenottoon on monia erilaisia menetelmiä. Lämmön talteenotto perustuu lämmönsiirtimeen. Lämmönsiirtimet jaotellaan kahteen tyyppiin rekuperatiivisiin ja regeneratiivisiin lämmönsiirtimiin. (Seppänen 1996, 285.)

## Suora rekuperatiivinen lämmönsiirrin

Lämmönsiirrin on rekuperatiivinen, kun se siirtää lämmön suoraan ilmavirtoja erottavan kappaleen lävitse esimerkiksi levylämmönsiirrin (kuva 3). Levylämmönsiirtimessä poisto- ja tuloilma erotetaan toisistaan hyvin lämpöä johtavalla levyllä, jolloin lämpö siirtyy suoraan poistoilmasta tuloilmaan. (Seppänen 1996, 286) Lämmön siirtymistä voidaan tehostaa asettamalla virtaukset vastakkaisiin suuntiin (Fläkt Woods Oy s.a.).



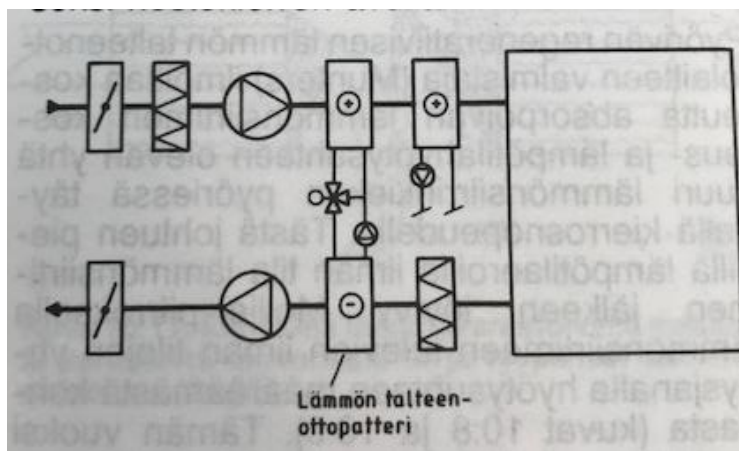
**Kuva 3.** Vastavirtakennoinen levylämmönsiirrin. (<http://oldfi.flaktwoods.fi/newsarchive3/eq-plate-vastavirtakennoinen-levylammonsiirrin/>)

## Epäsuora rekuperatiivinen lämmönsiirrin

Epäsuorassa rekuperatiivisessa lämmön talteenottolaitteistossa poistoilman lämpö otetaan talteen väliaineeseen, josta se siirretään tuloilmaan. Väliaineena käytetään tyypillisesti vesi-etyleeniglykoliseosta tai kylmäainetta, riippuen lämmön talteenottojärjestelmästä. Tällaisille järjestelmille on tyypillistä, ettei tulo- ja poistokanavaa tarvitse johtaa samaan paikkaan. Näin ollen nämä järjestelmät sopivat hyvin esimerkiksi korjausrakentamiseen. (Kasari 2010.)

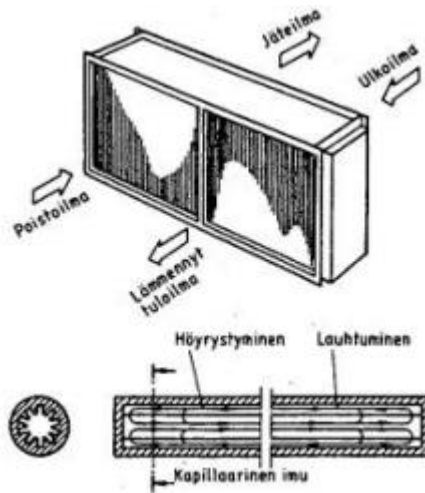
Epäsuorat rekuperatiiviset lämmön talteenottoratkaisut jaetaan kolmeen tyyppiin: nestekiertoiseen järjestelmään, lämpöputkipatteriin ja lämpöpumppuun. Nestekiertoisessa järjestelmässä poistoilman lämpö siirretään väliaineeseen, mikä on tyypillisesti vesi-etyleeniglykoliseos. Lämmönsiirtiminä käytetään lamellipattereita. Järjestelmällä voidaan saavuttaa 45 – 60 % lämpötila-hyötysuhde. Maksimaalinen hyötysuhde saavutetaan, kun kaikki lämpötilakapasiteettivirrat ovat yhtä suuria. (Seppänen 1996, 287.)

Epäsuoran nestekiertoisen lämmön talteenottojärjestelmän toimintaperiaate esitetään kuvassa 4. Nestekiertoisessa järjestelmässä neste varastoi lämpöä poistoilmakanavassa ja luovuttaa lämpönsä tuloilmaan. Nestettä kierrätetään pumpppaamalla. Jos pumpput ovat yhdistetty taajuusmuuttajaan, voidaan nesteen kiertonopeutta säädellä. Kiertävän nesteen ansiosta tulo- ja poistoilmakanavan ei tarvitse sijaita toistensa välittömässä läheisyydessä, näin ollen epäsuora nestekiertojärjestelmä sopii erittäin hyvin korjausrakentamiseen. (Kasari 2010.)



**Kuva 4.** Nestekiertoinen lämmöntalteenottojärjestelmä. (Seppänen 1996, 287)

Lämpöputkipatteri on patteri, jonka nesteputket ovat korvattu lämpöputkilla. Lämpöputkessa käytetään väliaineena kylmäainetta. Lämmön siirtimen toiminta perustuu faasimuutokseen eli kylmäaine lauhtuu ja höyrystyy vuorotellen. Lämpöputkipatterin toiminta esitetään kuvassa 5. Lauhtuminen tapahtuu tuloilmakanavassa ja höyrystyminen poistoilmakanavassa. Höyrstyessään kylmäaine sitoo itseensä lämpöä ja lämpö kulkeutuu patterin sisäpintaa pitkin tuloilmapuolelle. Lauhtuessaan tuloilmapuolella kylmäaine luovuttaa lämpöä tuloilmaan. Kapillaarivoiman ansiosta lauhde imeytyy takaisin höyrystymisosaan. Lämpöputkipatterin hyötysuhde on noin 50 - 80 %. Hyötysuhteen voidaan vaikuttaa patteria kallistamalla. Tällä tavoin voidaan ohjata painovoiman avulla nesteen kulkeutumista takaisin höyrystymispuolelle. (Seppänen 1996, 288.)



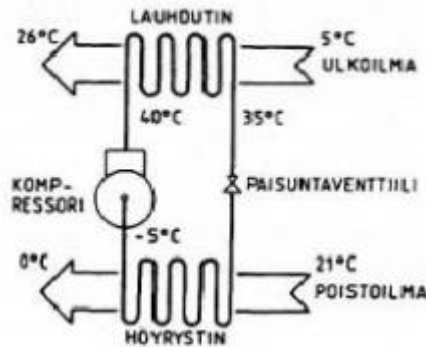
**Kuva 5.** Lämpöputkipatteri (Seppänen 1996, 288)

Lämpöputkipatterin jäätymistä täytyy kontrolloida. Tästä johtuen lämpöputkipatterin tuloilmapuolelle tulee sijoittaa sähköpatteri. Sähköpatteri estää jääty-  
misen, mutta heikentää lämpöputkipatterin kokonaishyötysuhdetta. (Kasari 2010.)

Lämmön talteenottolaitteena lämpöpumppu toimii kompressorin avulla. Komp-  
ressori vuorotellen höyrystää ja lauhduttaa väliaineena toimivaa kylmäainetta. Ilmanvaihtokoneessa höyrystin sijoitetaan poistoilmakanavaan ja lauhdutin  
tuloilmakanavaan. Kylmäaine höyrystetään poistoilmakanavassa, jolloin se  
sitoo itseensä lämpöä. Kompressori nostaa höyrystyneen kylmäaineen painet-  
ta, jolloin myös kylmäaineen lämpötila nousee. Lämpötila nostetaan oikealle  
tasolle tuloilmaan nähden. Höyrystetty, paineistettu ja lämmennyt kylmäaine  
siirtyy lauhdutinosaan. Lauhduttimessa kylmäaine lauhtuu takaisin nesteeksi  
ja luovuttaa lämpöä tuloilmaan. Lauhduttimen ja höyrystimen välillä on paisun-  
taventtiili. Paisuntaventtiili huolehtii, että höyrystinosan paine on matalampi  
kuin lauhduttimen. Kuvasta 6 on nähtävissä lämpöpumpun toimintaperiaate  
eräillä lämpötiloilla. (Kasari 2010.)

Lämpöpumpun tehokkuutta arvioidaan hyötysuhteella eli lämpöpumpun tapa-  
uksessa lämpökertoimella COP (Coefficient Of Performance). Lämpökerroin  
kertoo, kuinka hyvin sähköenergia saadaan muutettua lämmöksi. Koska COP-  
arvo mitataan aina +7 °C:n lämpötilassa, ei tästä voi päätellä lämpöpumpun  
todellista hyötysuhdetta pakkasessa. Tästä johtuen COP-arvoa on alettu kor-

vaamaan SCOP- arvoilla. SCOP-arvo tarkoittaa lämmityskauden lämpökerrointia. (RefGroup s.a.)



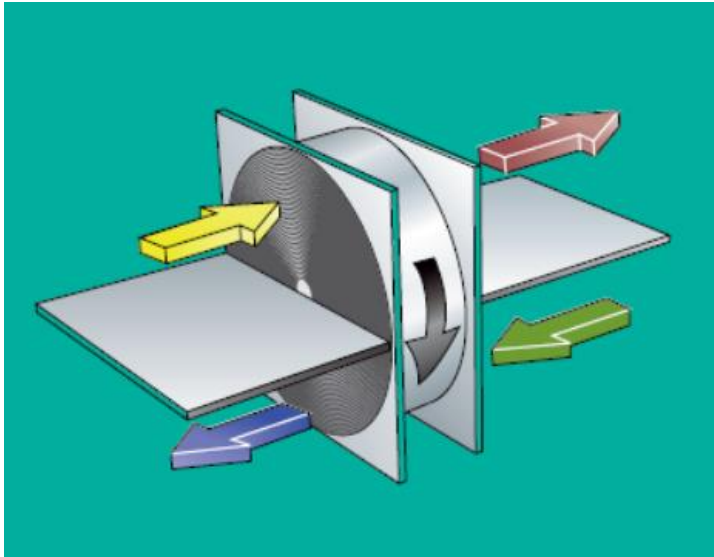
Kuva 6. Lämpöpumpun toimintaperiaate (Seppänen 1996, 290)

## Regeneratiivinen lämmönsiirrin

Regeneratiivinen lämmönsiirrin vuorollaan varastoi ja luovuttaa lämpöä. Lämpöä voi varastoida esimerkiksi neste tai massa. Regeneratiiviset lämmönsiirtimet voidaan jakaa pyöriviin ja virtausta vaihtaviin lämmön siirtimiin. Poistoilma lämmittää varastoivan aineen ja aine luovuttaa lämmön tuloilmaan. Regeneratiivinen lämmönsiirrin eroaa rekuperatiivisesta lämmönsiirtimestä kyvyllä siirtää kosteutta ja muita aineita ilmvirrasta toiseen (Seppänen 1996, 288).

Esimerkiksi pyörivässä lämmönsiirtimessä (kuva 7) kennosto varastoi lämpöä puolen kierroksen ajan ja luovuttaa lämpöä tuloilmaan puolen kierroksen ajan (Energiatehokas koti 2016). Materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa lämmönsiirtimen ominaisuuksiin (Seppänen 1996, 283).





**Kuva 7.** Pyörivälämmönsiirrin (<https://swegon.com/fi/Swegon-Home-Solutions/Tuotteet/Ilmanvaihtolaitteet/Pyorivakennoiset-R-sarja/CASA-R3-Smart/?selectedfolder=/Global/PDFs/Home+ventilation/Control+equipment/&p=1>)

Regeneratiivinen lämmön talteenotto voidaan toteuttaa myös kiinteää massaa vuorotellen lämmittäen ja jäädyttäen virtaussuuntaa vaihtamalla. Järjestelmän saaminen jatkuvaksi vaatii kaksi ohjattavaa massaa. Toisen jäähtyessä toinen lämpenee. Tuloilma johdetaan lämpimään massaan, joka lämmittää tuloilman. Poistoilma johdetaan viileään massaan ja lämmittää massan. Virtaussuuntaa vaihdetaan yhden tai useamman ilmapellin avulla jatkuvasti. Näin lämmön talteenottolaitteen toiminta pysyy jatkuvana. Ilmavirtojen jaksojen pituuksia lyhentämällä voidaan parantaa lämmönsiirtimen tehokkuutta. (Seppänen 1996, 299-300.)

### 3.2 Puhaltimet

Puhaltimet ovat merkittävässä osassa ilmanvaihtokoneen toimintaa. Puhaltimilla siirretään ilmamassoja ja luodaan paine-ero. Liike luodaan pyörivän siipipyörän avulla. Puhaltimet luokitellaan tyypillisesti neljään luokkaan ilman kulkusuunnan mukaisesti: keskipakopuhallin, aksiaalipuhallin, puoliaksaalipuhallin ja poikittaisvirtauspuhallin. Ilmanvaihtokoneen puhallintyyppi valitaan tarvittavan tilavuusvirran ja paine-eron saavuttamiseksi. (Seppänen 1996, 121-124.)

### 3.3 Jälkilämmityspatteri

Jälkilämmityspatterin tehtävänä on lämmittää ilma ennen kuin se puhalletaan sisätiloihin. Jälkilämmityspatteri sijaitsee ilmanvaihtokoneessa lämmön talteenottolaitteen jälkeen. Jälkilämmityspatteria käytetään, mikäli lämmön talteenottolaitte ei pysty lämmittämään tuloilmaa riittävän lämpimäksi. Jälkilämmityspatteri voi olla nestekiertoinen tai sähköllä lämpenevä. (Seppänen ym. 1996.)

Useimmiten nestekiertoinen jälkilämmityspatteri on yhdistetty kiinteistön lämmitysverkostoon (Seppänen ym. 1996, 174). Nestekiertoisessa järjestelmässä kiertoaineena on useimmiten vesi. Vesi kiertää patteriverkostossa pakotetusti pumpun avulla. Nestekiertoisen patterin lämmitystehoon voidaan vaikuttaa pumpun kierrosnopeutta muuttamalla ja venttiilin asentoa säätämällä.

Vesikiertoisessa patterissa on jäätymisvaara ulkolämpötilan laskiessa alle 0 °C:n. Tästä johtuen vesikiertoisissa pattereissa on veden kierto päällä jatkuvasti. Myös ilmanvaihtokoneen ollessa tilapäisesti pysähtyneenä. Lämmityspatterin pumpun vikatilanne voi pysäyttää patteriin kytketyn tulo- ja poistoilmakoneen kokonaan. (Korkala ym. 2012, 95-96.)

Sähköpatteri lämmittää tuloilman kanavassa olevilla vastuselementeillä. Sähköpatterin vastuselementtejä voidaan kytkeä päälle yksitellen tai pienissä osissa jolloin saavutetaan portaittainen lämpötilan säätö. Sähköpatterissa on ylikuumenemissuoja, mikä katkaisee virran patterin lämpötilan noustessa liian korkeaksi. Sähköpatteria ohjataan useimmiten automatiikalla. (Korkala ym. 2012, 97.)

### 3.4 Jäähdytyspatteri

Jäähdytyspatterin tehtävänä on viilentää tuloilmaa. Suomessa ulkolämpötila on useimmiten riittävän pieni viilentääkseen tuloilman. Kesällä ulkolämpötila voi kuitenkin nousta niin korkeaksi, ettei sillä voi jäähdyttää tuloilmaa. Tuloilman jäähdytystarpeen voi aiheuttaa huoneistossa olevat ihmiset, laitteet tai suuri ilmaisenergian määrä. (Korkala ym. 2012, 215-216.)

Jäähdytyspatteri on nestekiertoinen jäähdytyslaite. Kiertonesteenä käytetään vettä tai höyrystyvää kylmäainetta. Jäähdytyspatteri sijoitetaan ilmanvaihtokoneen tuloilmapuolelle viilentämään sisään puhallettavaa ilmaa tarvittaessa. Jäähdytyspatterit ovat usein lamellilämmönsiirtimiä, jotka ovat sijoiteltu poikittain tuloilmavirtaan nähden. Jäähdytetty vesi kulkee vesiputkilenkeissä, mitkä ovat yhdistetty jäähdytysvesiverkostoon. Jäähdytetty vesi kiertää verkostossa pumpun avulla. (Laine 2016.)

### 3.5 Ilmankostutin

Ilmankostutusta ilmanvaihdon yhteydessä käytetään harvoin, koska se lisää merkittävästi energian kulutusta. Kovalla pakkasella ilmaa joudutaan kuitenkin lämmittämään huomattavasti, jolloin ilman suhteellinen kosteus laskee erittäin alhaiseksi. Siitä huolimatta ilma kostutinta käytetään vain erityistapauksissa esimerkiksi joidenkin laitteiden vaatiessa. (Korkala ym. 2012, 100.)

Ilmankostutus voidaan toteuttaa kolmella eri laitteella: sumutuskostuttimella, haihdutuskostuttimella tai höyrykostuttimella. Sumutus- ja haihdutuskostuttimien toimintaperiaatteet ovat hyvin samankaltaiset. Vesi pumpataan vesisäiliöstä sumuttimiin tai haihdutuskennostoon. Sumuttimet sumuttavat vesipisaroita ilmavirran sekaan. Haihdutin kennostossa ilmavirta kulkee märän materiaalin lävitse. Vesi haihtuu ilmavirran sekaan. Veden höyrystymiseen tarvitaan huomattava määrä energiaa. Kostutin vaatii myös monia osia, joista monet ovat koko ajan kosteita tai märkiä. Nämä paikat tarjoavatkin erinomaiset kasvuolosuhteet monille bakteereille ja kasustoille. Veden höyrystyminen ilmavirrassa kuluttaa erittäin paljon lämpöenergiaa ja tämän lisäksi kostutinjärjestelmä vaatii huolellista puhdistusta jopa viikoittain. (Korkala ym. 2012, 99.)

Höyrykostutin poikkeaa aiemmin käsitellyistä kostuttimista siinä, että ilmavirran sekaan johdetaan veden sijasta höyryä. Höyry tuotetaan erillisessä höyrynyrkehitteimessä tai höyrynkostutinlaitteessa. Höyrykostutin ei aiheuta ilmaan biologisia epäpuhtauksia, mutta vaatii paljon sähköenergiaa veden keittämiseen ja höyryttämiseen. (Korkala ym. 2012, 100-101.)

## 4 ILMANVAIHDON ENERGIA TEHOKKUUS

Energiatehokkuudella tarkoitetaan kasvihuonepäästöjen minimointia ja energian tehokasta käyttöä (Energiavirasto s.a). Ilmanvaihdolla voidaan vaikuttaa merkittävästi kiinteistön energiatehokkuuteen. Jos kiinteistössä ei ole lämmön talteenottoa, puhalletaan ulos lämmintä ilmaa. Ulospuhallettava lämmin jäteilma sisältää valtavan määrän hyödyntämätöntä energiaa. Nykyään Suomen ympäristöministeriön D3 rakentamismääräyskokoelmassa on asetus lämmön talteenoton vähimmäisvaatimuksiin. Asetuksessa määrätään poistoilmasta otettavaksi talteen 45 % tuloilman lämmitykseen kuluva energia (Ympäristöministeriö 2011).

Ilmanvaihto on yksi suurimmista kiinteistön sähkönkuluttajista. Sähköä kuluttavat erityisesti ilmavirtoja ohjaavat puhaltimet. Sähkön kulutuksen lisäksi ilmanvaihdon energiatehokkuuden tarkastelussa on tärkeää kiinnittää huomio lämmön talteenoton tehokkuuteen ja toimintaan. (Korkala ym. 2012, 207-208.) Kiinnittämällä huomio energiatehokkuuden parantamiseen saavutetaan myös taloudellisia säästöjä.

### 4.1 Puhaltimet

Koneellisessa ilmanvaihdossa puhaltimet ovat tyypillisesti päällä jatkuvasti, jolloin sähkön kulutus on huomattavaa. Oikean kokoisilla ja oikein säädetyillä puhaltimilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä. Ilmanvaihtokoneen säädöissä on tärkeää huomioida tilan käyttöaika ja käyttötarkoitus. Jos tila on käyttämättömänä osan vuorokaudesta, voidaan silloin tilaan menevää raittiin ilman määrää pienentää. (Korkala ym. 2012.)

Rakentamismääräyskokoelman osassa D3 asetetaan ohjearvot myös sähkönkulutukseen. Sähkön kulutusta vertaillaan SFP-luvuilla. SFP-luvulla tarkoitetaan puhaltimen ominaissähkötehoa kilowateissa. Ilmanvaihtokoneessa missä on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä, korkein SFP-luku on 2,0 kilowattia. (Sandberg 2014a, 454.)

## 4.2 Lämmön talteenotto

Suurin lämpöenergian säästö saavutetaan lämmön talteenottolaitteen asennuksella (Seppänen ym. 1996, 260). Lämmön talteenotto ei aina välttämättä riitä lämmittämään tuloilmaa riittävään lämpötilaan, tällöin otetaan käyttöön jälkilämmityspatteri. Jälkilämmityspatterin käyttö lisää selvästi energian kulu- tusta, joten sen säätäminen tulee tehdä huolellisesti. Jos huonetilaan puhalle- taan liian lämmintä ilmaa, jää lämmin raitisilma pyörimään katonrajaan. Ener- giatehokkaampaa on siis puhaltaa tilaan hieman huoneilmaa viileämpää ilmaa ja antaa lämmitysjärjestelmän huolehtia huonelämpötilasta. (Energiatehokas ilmanvaihto 2012.)

## 4.3 Automaatiojärjestelmä

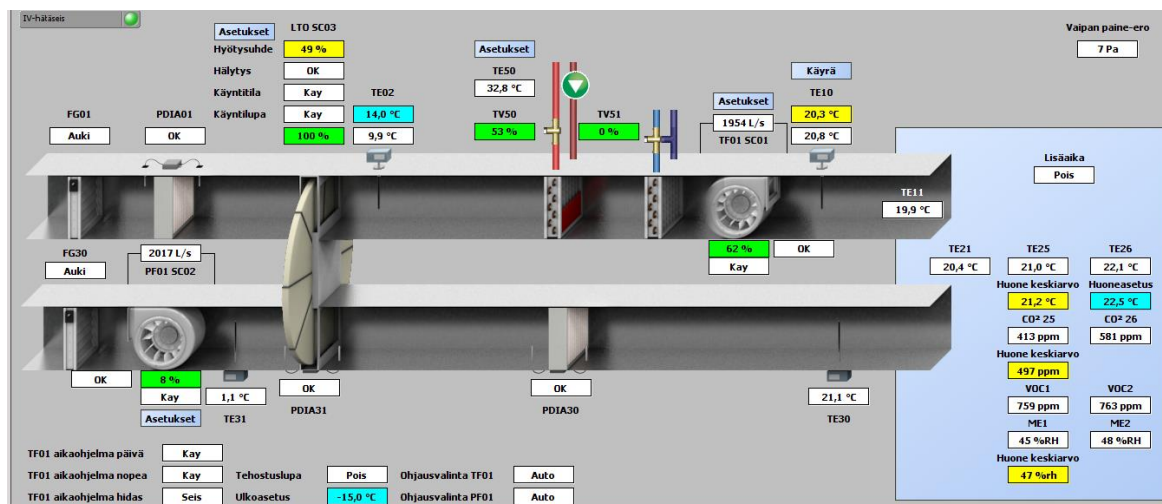
Ilmanvaihtojärjestelmä tulee toteuttaa, siten että sen toimintaa voidaan valvoa ja ohjata. Tärkeimpiä toiminta-arvoja täytyy olla mahdollista mitata. Useimmi- ten mittaus, valvonta ja ohjaus tapahtuvat osana automaatiojärjestelmää. Il- manvaihtokoneissa voi olla myös tarkastusluukkuja ja – ikkunoita laitteiden toimivuuden tarkastamiseksi. (Ympäristöministeriö 2010.)

Tärkeimpiä mittauksia ovat ulkolämpötila, tulo-, jäte ja poistoilmavirranlämpöti- lat sekä lämpötilat ennen ja jälkeen lämmitys- ja jäähdytyspatterin. Myös pai- ne-eroa suodattimien läpi tulee mitata. (Ympäristöministeriö 2010.)

Kiinteistön automaatiojärjestelmällä voidaan tehostaa ilmanvaihdon energia- tehokasta käyttöä. Automaatiojärjestelmään voidaan asettaa monia ilmanvaih- tokoneen käyttöä tehostavia toimintoja. Kiinteistön automaatiojärjestelmä seu- raa, raportoi, hälyttää ja mahdollisesti säätää automaatiojärjestelmään kytket- tyjä laitteita. (Korkala ym. 2012, 109-114.)

Automaatiojärjestelmän avulla ilmanvaihto voidaan asettaa tarvetta vastaa- vaksi. Näin vältetään turhalta ilmanvaihdolta. Automaation avulla ilmanvaihtoa voidaan ohjata esimerkiksi aikaohjelmien ja/tai sisäilman laadun perusteella (kuva 8). Aikaohjelmilla tarkoitetaan koneen tehokkuuden säätämistä kel- lonajan mukaan. Esimerkiksi toimistorakennuksessa ilmanvaihtoa tehostetaan työpäivän ajaksi ja rauhoitetaan yöksi, kun sisätiloissa ei ole käyttöä. Ilman- vaihtoa voidaan ohjata myös mittaussuureiden avulla. Tyypillisimpiä mittauk-

sia ovat huonelämpötila ja sisäilman hiilidioksidipitoisuus. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden noustessa yli asetusarvon automaatiojärjestelmä tehostaa ilmanvaihtoa. (Korkala ym. 2012, 109.)



**Kuva 8.** Ilmanvaihtokoneen automaatiojärjestelmä (AdConSys Oy:n esimerkkikoneen automaatiojärjestelmä)

Toimiakseen tehokkaasti ja energiaa säästävästi rakennusautomaatioon tulisi liittää kaikki kiinteistön talotekniikkaan ja olosuhteiden hallintaan liittyvät prosessit. Rakennusautomaatiojärjestelmällä on myös vaikutusta rakennuksen energiatehokkuusluokitukseen. Standardissa SFS-EN 15232 rakennusten energiatehokkuus määritellään eritasoisten automaatiojärjestelmien vaikutusta kiinteistöjen energiatehokkuusluokitukseen. (Sandberg 2014b, 305.)

Nykyaikaisella ja kehittyneellä automaatiojärjestelmällä voidaan seurata ilmanvaihdon toimintaa jopa huone tai ilmanvaihtokone kohtaisesti. Tarkalla seurannalla voidaan mahdolliset vikatilanteet havaita hyvissä ajoin. Automaatiojärjestelmän tulisi myös reagoida virhetilanteisiin mahdollisimman nopeasti. Virhetilanne voi olla esimerkiksi yhtäaikainen lämmitys ja jäähdytys. Nykyaikaisissa automaatiojärjestelmissä on lukitusohjelmat yhtäaikaisen lämmityksen ja viilentämisen estämiseksi. Hyvin toimiva automaatiojärjestelmä vaatii kuitenkin myös sitä hyvin osaavat käyttäjät. Suuri informaatio rakennuksen toiminnasta ei ole arvokasta, jos tietoja ei osata lukea oikein. (Sandberg 2014b, 305.)

#### 4.4 Muut energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Energiatehokkuuden parantamiseksi tulevat energiahäviöt minimoida. Ilmanvaihtokanaviston hyvä eristys edistää energiatehokkuutta, hyvin eristetystä kanavistosta lämpö ei pääse karkaamaan (Hyvä ilmanvaihto 2017). Hyvin eristetyn kanaviston lisäksi on syytä huolehtia riittävän puhtaasta kanavistosta sekä suodattimista. Epäpuhtaat kanavistot ja suodattimet heikentävät puhallustehoa sekä puhaltavat epäpuhdasta ilmaa sisätiloihin. (Energiatehokaskoti 2016b.)

Puhallustehon heikkenemisen lisäksi likaiset suodattimet ja kanavistot heikentävät lämmön talteenoton tehokkuutta. Lämmön talteenotto kennosto ei lämpene riittävästi likakerroksen läpi. Likaiset suodattimet pienentävät myös ilmantilavuusvirtoja. Pienentyneet tilavuusvirrat vähentävät hyödyksi saadun lämpöenergian määrää. Tämä aiheuttaa hyötysuhteen laskua. Alentunut hyötysuhde voi lisätä lämmitysenergian kulutusta. (Energiatehokas ilmanvaihto 2012.)

Jäähdytyksen ja kostutuksen tarpeen mukaisella käytöllä voidaan myös säästää merkittäviä säästöjä. Ulkolämpötilojen ollessa sopivat tulisi jäähdytyspat-  
terin sijasta käyttää yötuuletusta jolloin rakennukseen puhalletaan viileämpää ulkoilmaa. Myös lämmön talteenottolaitteen pois kytkentä kesän ajaksi vähentää jäähdytyksen tarvetta. Kesäaikaan jäähdytystarvetta voidaan vähentää myös ilmaiseenergian vähemmällä käytöllä, esimerkiksi sulkemalla ikkunäsäleiköt. (Korkala ym. 2012.)

### 5 LASKENTATYÖKALUN SUUNNITTELU

Tällä laskentatyökalulla pyritään esittämään ilmanvaihtokoneen energian kulutusta sekä kulutuksen aiheuttamia taloudellisia vaikutuksia. Kulutusta tarkastellaan myös ilmanvaihtokoneen eri osien välillä. Laskentatyökaluun erotellaan myös mahdolliset vikatilanteet ja niiden aiheuttamat kustannukset. Laskentatyökaluun luodaan kaavat, joista yritys voi ohjelmoida saavutettavat säästöt ja vikatilanteessa taloudelliset menetykset omaan automaatiojärjestelmään. Laskentatyökalu toteutetaan Excelillä.

## 5.1 Kohteen tiedot

Kohteessa on kaksi toimistohuonetta palvelevaa ilmanvaihtokonetta; TK1 ja TK2. Molemmat ilmanvaihtokoneet ovat varustettu lämmön talteenotolla, jälkilämmityspatterilla ja jäähdytyspatterilla. Ilmanvaihtokoneet ovat osana automaatiojärjestelmää ja niiden toimintaa voidaan tarkastella yksityiskohtaisesti.

Lämmön talteenotto on toteutettu pyörivillä lämmön talteenottokiekoilla. Puhaltimien moottorit ovat yhdistetty taajuusmuuntajiin ja puhaltimen tehoa säädel-  
lään tarpeen mukaisesti. Puhaltimen tehon säätö perustuu sisäilman laatuun. Kohteen ilmanvaihtokoneet ovat jo melko iäkkäitä eikä energiatehokkuus vastaa nykyisiä ilmanvaihtokoneita. Eräs merkittävä ero nykyisiin laitteisiin on lämmityspatterit. Nämä esimerkkikoneet eivät käy, ellei lämmityspatterin pumppu ole käynnissä. Lämmityspatterit on käynnissä siis aina ilmanvaihtokoneen ollessa käynnissä ulkoilman lämpötilasta riippumatta.

## 5.2 Laskennan tavoitteet

Laskennalla pyritään esittämään yritykselle ilmanvaihdon kulutus energiamääränä ja rahallisena arvona. Energian kulutuksen laskennan jälkeen, laskelmista muodostetaan kuvaajat. Kuvaajien avulla selvitetään koneen käyttäytymisen ulkolämpötilan suhteen ja muodostetaan yhtälöt joiden perusteella luodaan Excel-pohjainen laskentatyökalu.

# 6 LASKENTA

Molemmille esimerkki-koneille tehdään samanlaiset laskentatoimenpiteet koneen omilla arvoilla. Tämän työn laskenta-arvot ovat salaisia. Työssä esitetään laskennassa käytetyt kaavat ja menetelmät.

## 6.1 Puhaltimien energian kulutus

Puhaltimien energian kulutuksella tarkoitetaan tulo- ja poistoilmavirtoja ohjaavia puhaltimia. Puhaltimet kuluttavat ainoastaan sähköenergiaa. Puhaltimen sähköenergian kulutus lasketaan puhaltimen ottavan tehon ja käyntiajan tulona. Puhaltimien ottotehot ovat luettu kohteessa. Puhaltimien taajuusmuuttajien



näytöistä. Puhaltimet ovat päällä jatkuvasti, joten käyntiaikana käytetään vuoden tunteja. Puhaltimen sähköenergian kulutus lasketaan kaavalla 1.

$$E = P \cdot t \quad (1)$$

jossa	$E$	sähköenergian kulutus	[kWh]
	$P$	sähköteho	[kW]
	$t$	käyntiaika	[h]

Puhaltimien kokonaisenergian kulutus on tulo- ja poistopuhaltimien energiankulutuksen summa. Tämä lasketaan kaavalla 2.

$$E_{yht} = E_{tp} + E_{pp} \quad (2)$$

jossa	$E_{yht}$	puhaltimien kokonaisenergian kulutus	[kWh]
	$E_{tp}$	tulopuhaltimen energian kulutus	[kWh]
	$E_{pp}$	poistopuhaltimen energian kulutus	[kWh]

## 6.2 Jälkilämmityspatterin energian kulutus

Jälkilämmityspatterin kulutuksen laskennassa tarkastellaan tuloilman jälkilämmitykseen kulunutta lämmitysenergiaa sekä jälkilämmityspatterin pumpun kuluttamaa sähköenergiaa. Jälkilämmityspatterin tehon tarve riippuu lämmön talteenottolaitteen hyötysuhteesta. Mitä enemmän lämmön talteenottolaitteella voidaan tuloilmaa lämmittää, sitä vähemmän tehoa jälkilämmityspatteri tarvitsee. Lämmön talteenottolaitteen hyötysuhde riippuu lämpötilaerosta. Lämpötilaeron ollessa suuri, hyötysuhde on parempi.

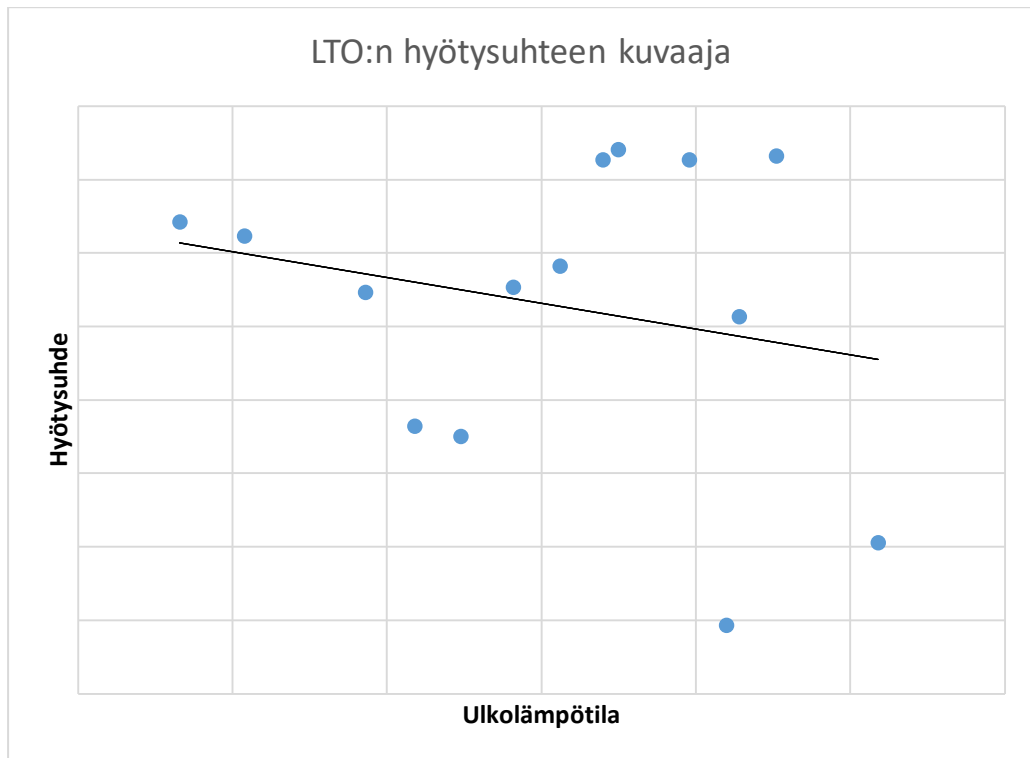
Laskenta aloitettiin seuraamalla automaatiojärjestelmästä lämmön talteenoton hyötysuhteen käyttäytymistä eri lämpötiloissa. Hyötysuhde lasketaan ulkoilman, sisäilman ja lämmön talteenottolaitteen jälkeisen lämpötilojen sekä tulo- ja poistoilmavirtojen avulla. Hyötysuhde lasketaan kaavalla 3.

$$\eta_{LTO} = \frac{t_j - t_u}{t_e - t_u} \cdot \frac{q_{vt}}{q_{vp}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

jossa	$\eta_{LTO}$	hyötysuhde	[%]
	$t_j$	LTO:n jälkeinen lämpötila	[°C]
	$t_u$	ulkolämpötila	[°C]
	$t_s$	lämpötila ennen LTO:ta	[°C]
	$q_{vt}$	tuloilman tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
	$q_{vu}$	poistoilman tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]

Automaatiojärjestelmästä saatujen arvojen perusteella voidaan määrittää lämmön talteenoton hyötysuhde. Automaatiojärjestelmää tarkkaillaan ulkolämpötilan muuttuessa ja hyötysuhde lasketaan ulkolämpötilan vaihtuessa. Ulkolämpötilat ja laskennalliset hyötysuhteet taulukoidaan.

Taulukon arvojen perusteella voidaan muodostaa hyötysuhteen yhtälö ulkolämpötilan suhteen (kuva 9). Tämän yhtälön avulla voidaan arvioida lämmön talteenoton hyötysuhdetta erilaisilla ulkolämpötiloilla. Yhtälön avulla voidaan myös asettaa hyötysuhteelle hälytysraja automaatiojärjestelmään. Hälytysrajan avulla automaatiojärjestelmän käyttäjä saa tiedon, jos lämmön talteenotto-laitteen hyötysuhde putoaa normaalitasoa alemmas. Yhtälön avulla saadaan selville lämmön talteenotto-laitteen teoreettinen hyötysuhde. Tästä syystä hälytysrajaa ei kannata asettaa aivan laskennallisen arvon alapuolelle. Automaatiojärjestelmässä on aina myös pientä viivettä ja myös tämä voisi aiheuttaa turhia hälytyksiä.



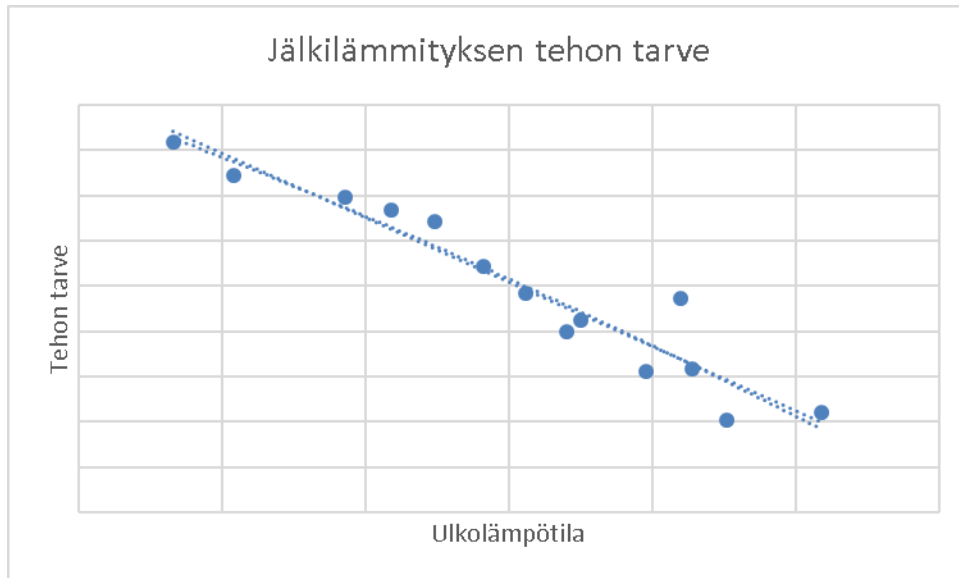
Kuva 9 Hyötysuhteen kuvaaja

Hyötysuhteen selvittämisen jälkeen lasketaan jälkilämmityksen tehon tarve. Tehon tarve saadaan laskettua kaavalla 4.

$$\phi = c_{pi} \rho_i q_{vt} (t_s - t_j) \quad (4)$$

jossa	$\phi$	jälkilämmityksen tehon tarve	[kW]
	$c_{pi}$	ilman ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg K]
	$\rho_i$	ilman tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$q_{vt}$	tuloilman tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
	$t_s$	tuloilman sisäänpuhalluslämpötila	[°C]
	$t_j$	lämpötila LTO:n jälkeen	[°C]

Edellä olevien laskutoimitusten avulla selvitettiin jälkilämmityksen tehontarve tietyillä ulkolämpötiloilla. Laskenta-arvot taulukoidaan. Näiden avulla voidaan muodostaa kuvaaja. Kuvaajan avulla voidaan muodostaa yhtälö jälkilämmityksen tehon tarpeelle ulkoilmanlämpötilan funktiona (kuva 10).



**Kuva 10.** Jälkilämmityksen tehon tarve

Jälkilämmityksen tehontarpeen yhtälö saadaan kuvaajasta. Jotta tehon tarve voidaan muuttaa lämmitysenergiaksi, täytyy selvittää lämmitykseen kulunut aika. Lämpötilojen pysyvyystiheydet ovat saatavissa ilmatieteenlaitoksen tilastoista. Kohde sijaitsee Kotkassa, joten laskennassa käytetään vyöhykkeen yksi tilastoa (liite 1). Tilastosta voidaan laskea lämpötilojen  $-21 \dots 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$  esiintyvyyt tunteina vuodessa. Lämpötilakohtaiset tuntimäärät löytyvät liitteestä 2. Jälkilämmityksen kuluttama lämpöenergia lasketaan kaavalla 5.

$$Q = \phi \cdot t \quad (5)$$

jossa	$Q$	lämpöenergia	[kWh]
	$\phi$	lämpöteho	[kW]
	$t$	käyttöaika	[h]

Lämpöenergian tarve lasketaan jokaiselle ulkolämpötilalle. Lämmitysenergian lisäksi jälkilämmityspatterin kuluttaa myös sähköä. Sähköä kuluttaa patterin pumppu. Tässä tapauksessa jälkilämmityspatterin pumppu on varotoimenpiteenä päällä jatkuvasti vuoden ympäri. Pumpun kuluttama sähköenergia voidaan laskea kaavalla 1.

Pumpun ottama sähköteho oli luettavissa pumpun tyyppikilvestä ja pumpun ollessa päällä jatkuvasti käyttöaikana käytetään vuoden tuntimäärää 8 760 h.

### 6.3 Jäähdytyksen energian kulutus

Tässä opinnäytetyössä lasketaan vain jäähdytyspumppun kuluttama energia, Jäähdytyksen kokonaisenergian kulutus tulisi tehdä lämmityskauden ulkopuolella, jotta todellinen jäähdytystehon tarve olisi määriteltävissä.

Vedenjäähdytyskoneesta lähti yksi jäähdytyspiiri, joka palveli molempia ilmanvaihtokoneita. Jäähdytyspumppua ei ollut yhdistetty taajuusmuuttajaan, joten pumppu kävi vain yhdellä teholla. Jäähdytystehoa säädetään venttiileillä. Jäähdytystehon ollessa nolla venttiilit ovat kokonaan kiinni. Tässä kohteessa jäähdytyspumppun ulkolämpötila raja on -20 °C. Eli jäähdytyspumppu on käynnissä aina tätä lämpötilaa lämpimämissä olosuhteissa. Tämä tarkoittaa sitä, että jäähdytyspumppu on päällä vuoden ympäri. Jäähdytyspumppun kuluttama sähköenergia voidaan laskea kaavalla 1.

$$E = P \cdot t$$

### 6.4 Ilmanvaihtokoneen kokonaisenergiankulutus

Ilmanvaihtokoneen kokonaisenergiankulutus saadaan selville laskemalla kaikkien osien energiankulutus yhteen. Sähköenergian kulutus lasketaan kaavalla 4.

$$E_{kok} = E_{tp} + E_{pp} + E_{lp} + E_{jp} \quad (4)$$

jossa,	$E_{kok}$	Sähköenergian kokonaiskulutus [kWh]
	$E_{tp}$	Tulopuhaltimen sähkön kulutus [kWh]
	$E_{pp}$	Poistopuhaltimen sähkön kulutus [kWh]
	$E_{lp}$	Lämmityspatterin pumpun sähkön kulutus [kWh]
	$E_{jp}$	Jäähdytyspatterin pumpun sähkön kulutus [kWh]

Lämpöenergiaa ilmanvaihtokoneessa kuluttaa ainoastaan lämmityspatteri. Näissä esimerkkikoneissa lämmityspatteri oli yhdistetty kiinteistön lämmitysjärjestelmään. Jälkilämmityspatterin saa lämpöenergian tässä tapauksessa kaukolämmöstä. Jälkilämmityspatterin käyttämä lämpöenergia on kappaleessa 6.2.

## 6.5 Laskentatyökalu

Aiemmissa kappaleissa suoritetuista laskelmista muodostettiin kuvaajat hyötysuhteelle ulkoilman lämpötilan funktiona sekä jälkilämmityksen tehon tarpeelle ulkoilman lämpötilan suhteen. Näiden kuvaajien avulla saatiin selville hyötysuhteen ja jälkilämmityksen tehon tarpeen yhtälöt. Yhtälöitä hyväksi käyttäen luotiin Excel-pohjainen laskentatyökalu (kuva 10). Laskentatyökalua apuna käyttäen yritys voi arvioida hyötysuhdetta, jälkilämmityksen tehon tarvetta, energian kulutusta ja kustannuksia.

Laskentatyökalua apuna käyttäen yritys voi ohjelmoida edellä mainitut laskennat osaksi automaatiojärjestelmäänsä. Näin automaatiojärjestelmän käyttäjä ymmärtää paremmin ilmanvaihtokoneen kulutusta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Yksi laskentatyökalun osa laskee energian kulutusta lämmön talteenottolaitteen ollessa vikaantunut. Lämmön talteenottolaitteen vikatilanteen hyötysuhteeksi on valittu 20 %. Pyörivä lämmön talteenottolaitte sijaitsee tuloilma-kanavassa ja on oletettavissa, että myös vikatilanteessa järjestelmä voi siirtää lämpöä. Näitä vikatilanteita voivat olla esimerkiksi kennoston pysähtyminen tai likaisuus. Tämä hyötysuhde on vain suuntaa antava ja todellinen hyötysuhde on laskettavissa kaavalla 3.

TK 1											
Ulkolämpötila [°C]	LTO:n hyötysuhde [%]	Hyötysuhteen hälytysraja [%]	Jälkilämmityksen tehon tarve [kW]	Lämmityksen tila	Kulunut aika [h]	Energian kulutus [kWh]	Hinta [€]	Jälkilämmityksen tehon tarve, LTO rikki [kW]	Kulunut aika [h]	Energian kulutus [kWh]	Hinta [€]
-1											

Kuva 11 Laskentatyökalu

Mahdollisen vikatilanteen energian kulutus on laskettu, selvittämällä ensin lämpötila vikaantuneen lämmön talteenottolaitteen jälkeen. Tämä laskenta on johdettu kaavasta 3. Tulo- ja poistoilmavirta oletetaan yhtä suuriksi, joten niitä ei tarvitse huomioida.

$$\eta_{LTO} = \frac{t_j - t_u}{t_e - t_u}$$

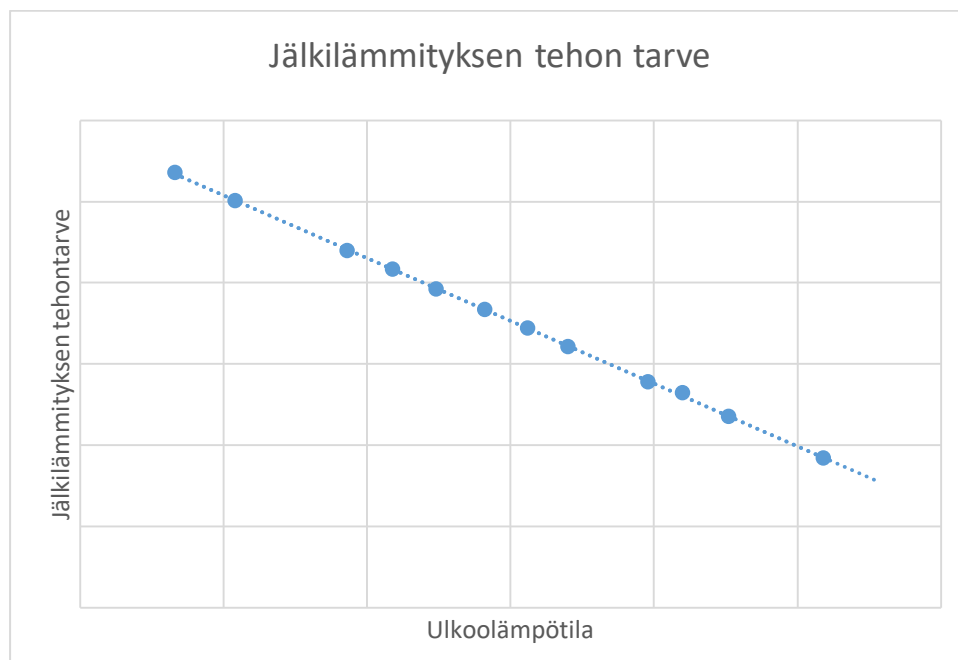
$$\eta_{LTO} \cdot (t_e - t_u) = t_j - t_u$$

$$\eta_{LTO} \cdot (t_e - t_u) + t_u = t_j$$

Lämmön talteenoton jälkeisen lämpötilan ollessa tiedossa voidaan jälkilämmitystehon tarve laskea kaavalla 4.

$$\phi = c_{pi} \rho_i q_{vt} (t_s - t_j)$$

Jälkilämmitystehon tarvetta lasketaan eri ulkolämpötilan arvoilla. Laskentatulokset taulukoidaan. Taulukon pohjalta luodaan kuvaaja (kuva12).



**Kuva 12** Jälkilämmityksen tehon tarve, lämmön talteenoton vikatilanteessa

Kuvan 12 kuvaajan avulla voidaan muodostaa yhtälö. Tämän yhtälön avulla voidaan määrittää jälkilämmityksen tehontarve kaikilla ulkolämpötiloilla. Ohjeita laskentatyökalun käyttöön ja ohjelmointiin löytyy liitteestä 3.

## 7 LASKENNAN ANALYSOINTI

Laskentatyökalua luodessa huomattiin mittaustulosten välillä suuria eroja. Näin ollen myös kuvaajasta luotu yhtälö ei ole täysin tarkka. Tarkemman las-

kentatyökalun luomiseksi tulisi saada enemmän mittaustuloksia. Tarkempia tuloksia olisi mahdollista saavuttaa pidemmällä seurannalla. Tämän lisäksi olisi hyvä lisätä automaatiojärjestelmän ohelle omia mittauksia. Näin voitaisiin varmistaa, etteivät automaatiojärjestelmän mittaukset ole virheellisiä.

Etenkin hyötysuhteen mittaustulokset olivat erittäin hajanaisia. Talvella kova jälkilämmityksen teho voi tehdä virhettä mittaustuloksiin. Jälkilämmitys tuottaa niin suuren määrän lämpöä tuloilmakanavistoon, että ilman lämpötila voi nousta jo ennen kuin se läpäisee jälkilämmityspatterin.

Kaikki laskenta-arvot ovat kerätty yrityksen automaatiojärjestelmästä. Automaatiojärjestelmän viive voi aiheuttaa myös pientä virhettä mittaustuloksiin. Tästä johtuen todellinen arvo poikkeaa aina laskennallisesta arvosta. Laskentatyökalun tarkkuutta olisi mahdollisuus parantaa jatkuvalla mittausarvojen tilastoinnilla ja yhtälön tarkentamisella.

## **8 TULOSTEN TARKASTELU**

Ilmanvaihtokoneiden kokonaisenergian kulutusta tarkastellessa huomataan sähköenergian määrän olevan melko suuri. Kaikki puhaltimet ja pumpput ovat käytössä jatkuvasti vuoden ympäri. Tällöin pumppujen ja puhaltimien tarpeen mukaiseen säätöön tulee kiinnittää huomiota.

Puhaltimien on syytä olla käytössä jatkuvasti, jotta ilmanvaihto kiinteistössä toimii kokoajan. Puhaltimien käyntiajat ja tehot tulee kuitenkin säätää tarvetta vastaavaksi. Tässä kohteessa puhaltimien tehon säätö perustui sisäilman laatuun. Puhaltimien käyttö tehostui, sisäilman laadun esimerkiksi hiilidioksidipitoisuuden noustessa.

Puhaltimien toimintaa seurattaessa, oli automaatiojärjestelmästä kuitenkin havaittavissa, ettei puhallin vähentänyt tehoa mahdollisuuden tullen. Automaatiojärjestelmään olisi hyvä lisätä koneelle hitaampi käynti ilman laadun sallies-  
sa. Toinen mahdollisuus olisi asettaa puhaltimille aikaohjelmien mukaiset käyntiajat. Tällöin puhallin kävisi kovemmalla teholla päivisin ja pienemmällä teholla öisin.



Puhaltimien ohella sähköä kuluttivat jälkilämmityspattereiden ja jäähdytyspattereiden pumput. Jälkilämmityspatteri oli varotoimenpiteenä päällä jatkuvasti. Jälkilämmityspatteri on sijoitettu ilmakehään lämmön talteenottolaitteen jälkeen. Jälkilämmityspatteriverkoston todellinen jäätymisuhka on vain ulkoilman lämpötilan laskiessa alle nollan asteen. Tätä lämpimämmissä tilanteissa jälkilämmityspatterin pumppu voisi olla päällä tarvittaessa.

Jäähdytyspatterin pumppu oli säädetty toimivaksi aina ulkolämpötilan 20 pakkasteeseen. Lämpötilojen pysyvyystiheystaulukosta (liite 1), on huomattavissa, ettei tällä vyöhykkeellä lämpötila laske teoriassa tuota alemmas. Tällöin myös jäähdytyspumppu on päällä vuoden ympäri, vaikka Suomessa ulkoilma riittää täyttämään jäähdytystarpeen suurimman osan ajasta vuodessa (Korkala ym. 2012, 215).

## 9 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli laskea AdConSys Oy:n asiakasyrityksen ilmanvaihtokoneiden energian kulutus sekä luoda saatujen tietojen pohjalta laskentatyökalu energian kulutuksen seurantaan. Lisäksi työssä selvitettiin ilmanvaihdon tarvetta ja toimintaperiaatetta yleisesti.

Laskenta aloitettiin seuraamalla AdConSys Oy:n automaatiojärjestelmää. Järjestelmästä kerättiin tietoja ilmanvaihtokoneen toiminnasta eri ulkolämpötiloilla noin kolmen kuukauden ajalta. Tietojen perusteella laskettiin lämmön talteenoton hyötysuhde ja jälkilämmitystehon tarve. Tiedot taulukointiin ja niistä muodostettiin kuvaaja, josta saatiin yhtälöt hyötysuhteen ja jälkilämmitystehon tarpeen käyttäytymiseen ulkolämpötilan suhteen.

Automaatiojärjestelmästä seurattiin myös sähkön kulutusta. Ilmanvaihtokoneen merkittävimmät sähkön kuluttajat ovat ilmavirtoja liikuttavat puhaltimet. Puhaltimien lisäksi sähköä kuluttavat jälkilämmitys- ja jäähdytyspattereiden pumput. Automaatiojärjestelmästä ei ollut suoraan saatavilla sähköenergian kulutustietoja. Puhaltimista seurattiin ohjaustaajuuksia. Tämän jälkeen puhaltimien sähkön ottotehot käytiin lukemassa puhaltimien taajuusmuuttajista.

Ilmanvaihtojärjestelmän pumppuja ei ollut kytketty taajuusmuuttajiin, joten pumppujen ottama teho oli kokoajan sama. Lämmitys- ja jäähdytyspatterin lämpötehoja ohjattiin venttiileillä. Pumppujen tehot luettiin kohteesta pumppujen tyyppikilvistä.

Ilmanvaihtokoneista laskettiin puhaltimien, pumppujen ja jälkilämmityksen energian kulutusta sekä näiden kokonaiskulutus. Kulutuslaskennan tulokset ovat täysin laskennallisia arvoja ja saattavat täten poiketa todellisesta kulutuksesta. Asiakasyrityksen hintatiedot eivät olleet tiedossa, joten kustannuslaskennassa käytetyt energian hinnat eivät ole asiakasyrityksen todellisia hintatietoja.

Laskennan avulla saavutetut tulokset antavat hyvän arvion ilmanvaihtokoneen energian kulutuksesta. Todellinen kulutus olisi selvitettävissä vain jatkuvalla mittauksella. Tuloksia olisi voinut tarkentaa pidemmällä mittausjaksolla sekä asettamalla omia mittauksia automaatiojärjestelmän rinnalle.

Laskennan pohjalta luotu laskentatyökalu onnistui hyvin. Laskentatyökalun mittausdata on täydennettävissä ja näin laskentatyökalun toimintaa voidaan parantaa. Todellinen toimivuus selviää vasta käytössä. Laskentatyökalu perustuu teoreettiseen laskentaan, joten kokeilun jälkeen työkalua voidaan muokata todellisuutta paremmin vastaavaksi.

## LÄHTEET

Energiatehokas koti. 2016a. Pyörivä lämmöntalteenotto (LTO) -laite. Internet-sivusto. Päivitetty 19.1.2016. Saatavissa:

[http://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan\\_suunnitelu/ilmanvaihto/pyoriva\\_lammonsiirrin](http://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnitelu/ilmanvaihto/pyoriva_lammonsiirrin) [viitattu 7.1.2018].

Energiatehokaskoti. 2016b. Energiatehokas ilmanvaihto ja jäähdytys. Internet-sivusto. Päivitetty 15.3.2016. Saatavissa:

[http://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/miten\\_tehdaan\\_energiatehokaskoti/energiatehokas\\_ilmanvaihto\\_ja\\_jaahdytys](http://www.energiatehokaskoti.fi/perustietoa/miten_tehdaan_energiatehokaskoti/energiatehokas_ilmanvaihto_ja_jaahdytys) [viitattu 7.1.2018].

Energiavirasto. s.a. Energiatehokkuus. Internet-sivusto. Saatavissa:

<https://www.energiavirasto.fi/energiatehokkuus> [viitattu 11.1.2018].

Fläkt Woods Oy. s.a. Fläkt Woods tuo markkinoille vastavirtakennoisen levylämmönsiirtimen eQ Platen. Internet-sivusto. Saatavissa:

<http://oldfi.flaktwoods.fi/newsarchive3/eq-plate-vastavirtakennoinen-levylammonsiirrin/> [viitattu 7.1.2018].

Hengitysliitto. s.a. Sisäilma-asiat & sisäilmaongelmat. Internet-sivusto. Saatavissa:

<https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/sisailma-asiat-sisailmaongelmat> [viitattu 15.1.2018].

Kasari, I. 2010. Teollisuuskiinteistön ilmanvaihtokoneen LTO-laitteiston hyötysuhteen parantaminen. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Kandidaatin työ.

Ketola, J. 2014 Painovoimaisen ilmanvaihdon käyttö ja huolto. Tampere: Pirkanmaan rakennuskulttuuriyhdistys ry.

Korkala, T. & Laksola, J. 2012 Ilmastointi Hoito ja huolto. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus Oy.

Laine, M. 2016 Ilmastoinnin vesikiertoisen jäähdytysjärjestelmän optimointi. Saatavissa:

<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23713/laine.pdf?sequence=1> [viitattu 22.1.2018].

Machine Design. 2015. What's the difference between Conduction, Convection and Radiation? Internet-sivusto. Päivitetty 30.10.2015. Saatavissa:

<http://www.machinedesign.com/whats-difference-between/what-s-difference-between-conduction-convection-and-radiation> [viitattu 23.3.2018].

Motiva. 2012. Energiatehokas ilmanvaihto. Tiedosto internet-sivulta. Saatavissa:

[https://www.motiva.fi/files/6147/Energiatehokas\\_ilmanvaihto2012.pdf](https://www.motiva.fi/files/6147/Energiatehokas_ilmanvaihto2012.pdf) [viitattu 9.12.2017].

Motiva. 2017. Hyvä ilmanvaihto. Internet-sivusto. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/hyva\\_arki\\_kotona/hyva\\_ilmanvaihto](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/hyva_arki_kotona/hyva_ilmanvaihto) [viitattu 17.12.2017].

Motiva. 2017. Ilmanvaihto. Internet-sivusto. Päivitetty 20.11.2017. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/remontoi\\_ja\\_huolla/energiatehokas\\_sahkolammitys/ilmanvaihto](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/remontoi_ja_huolla/energiatehokas_sahkolammitys/ilmanvaihto) [viitattu 9.12.2017].

Napari, I.;& Vehkamäki, H. 2013. Termofysiikan perusteet. Tiedosto internet-sivulta. Päivitetty 18.12.2013. Saatavissa: [http://www.courses.physics.helsinki.fi/fys/termo/termofysiikka2013\\_hv.pdf](http://www.courses.physics.helsinki.fi/fys/termo/termofysiikka2013_hv.pdf) [viitattu 22.1.2018].

RefGroup. s.a. Energian säästö ja lämpökertoimet. Internet-sivusto. Saatavissa: <http://www.ilmalampopumput.fi/fi/mika-ihmeen-lampopumppu/energian-saasto> [viitattu 23.3.2018].

Sandberg, E. 2014a. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Teoksessa Ilmastointitekniikka osa 2, s. 453-454 Tammerprint.

Sandberg, E. 2014b. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Teoksessa Ilmastointitekniikka osa 1, s.304-309. Tammerprint.

Seppänen, O.1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo.

Seppänen, O.;& Seppänen, M. 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Espoo: Bookwell Oy.

Tekeville. 2018. Kodin ilmanvaihto. Internet-sivusto. Päivitetty 20.2.2018. Saatavissa: <http://www.tekeville.fi/kodin-ilmanvaihto> [viitattu 21.3.2018.]

The indoor climate is important for health, well-being and productive work. 2014. University of Bergen. Internet-sivusto. Päivitetty 10.11.2017. Saatavissa: <http://www.uib.no/en/hms-portalen/79904/indoor-climate> [viitattu 26.3.2018].

Ympäristöministeriö. 2010. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki.

Ympäristöministeriö. 2011. Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet. Tiedosto internet-sivulta. Saatavissa: [http://www.finlex.fi/data/normit/37188/D3-2012\\_Suomi.pdf](http://www.finlex.fi/data/normit/37188/D3-2012_Suomi.pdf) [viitattu 18.12.2017].

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä. Kuvakaappaus.

Saatavissa:

<https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/ilmanvaihto/ilmanvaihtojarjestelmat> [viitattu 15.1.2018].

Kuva 2. Koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä. Kuvakaappaus. Saatavissa:

<https://www.sisailmauutiset.fi/tutkimus/ilmanvaihdon-ja-ilmastoinnin-suunnitteluun/> [viitattu 15.1.2018].

Kuva 3. Vastavirtakennoinen levylämmönsiirrin. Kuvakaappaus.

Saatavissa:

<http://oldfi.flaktwoods.fi/newsarchive3/eq-plate-vastavirtakennoinen-levylammonsiirrin/> [viitattu 7.1.2018].

Kuva 4. Nestekiertoinen lämmön talteenottojärjestelmä  
Seppänen, O. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo, 287

Kuva 5. Lämpöputkipatteri Seppänen, O. 1996.  
Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo, 288

Kuva 6. Lämpöpumpun toimintaperiaate Seppänen, O. 1996.  
Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo, 290

Kuva 7. Pyörivä lämmönsiirrin. Kuvakaappaus. Saatavissa:

<https://swegon.com/fi/Swegon-Home-Solutions/Tuotteet/Ilmanvaihtolaitteet/Pyorivakennoiset-R-sarja/CASA-R3-Smart/?selectedfolder=/Global/PDFs/Home+ventilation/Control+equipment/&p=1>

[viitattu 7.1.2018].

Kuva 8. Ilmanvaihtokoneen automaatiojärjestelmä. Kuvakaappaus AdConSys Oy:n automaatiojärjestelmästä. Ei saatavissa.

Kuva 9. Hyötysuhteen kuvaaja

Kuva 10. Jälkilämmityksen tehon tarve

Kuva 11. Laskentatyökalu

Kuva 12. Jälkilämmityksen tehon tarve, lämmön talteenoton vikatilanteessa

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	vuosi	talvi	kesä	
	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744	8760	6552	2208	
-21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21
-20	0.0027	0.0074	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0008	0.0011	0	-20
-19	0.0067	0.0238	0.0067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003	0.004	0	-19
-18	0.0202	0.0417	0.0081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0056	0.0075	0	-18
-17	0.0309	0.0536	0.0094	0	0	0	0	0	0	0	0.0056	0	0.008	0.0107	0	-17
-16	0.0444	0.0729	0.0148	0	0	0	0	0	0	0	0.0097	0	0.0114	0.0153	0	-16
-15	0.0766	0.1086	0.0202	0	0	0	0	0	0	0	0.0139	0	0.0177	0.0237	0	-15
-14	0.0927	0.1682	0.0323	0	0	0	0	0	0	0	0.0361	0.0081	0.0272	0.0363	0	-14
-13	0.1089	0.2024	0.0376	0	0	0	0	0	0	0	0.0528	0.0242	0.0344	0.0459	0	-13
-12	0.1358	0.2292	0.0511	0	0	0	0	0	0	0	0.0722	0.0376	0.0426	0.0569	0	-12
-11	0.1492	0.2426	0.0591	0	0	0	0	0	0	0	0.0931	0.0538	0.0485	0.0649	0	-11
-10	0.1613	0.2649	0.0712	0	0	0	0	0	0	0	0.1042	0.0645	0.0541	0.0723	0	-10
-9	0.1868	0.2768	0.0806	0	0	0	0	0	0	0	0.1097	0.0793	0.0597	0.0798	0	-9
-8	0.2151	0.2932	0.1089	0	0	0	0	0	0	0	0.1264	0.0941	0.0684	0.0914	0	-8
-7	0.2567	0.3244	0.1599	0	0	0	0	0	0	0	0.1431	0.125	0.0826	0.1105	0	-7
-6	0.2796	0.369	0.2191	0	0	0	0	0	0	0	0.1681	0.1747	0.0993	0.1328	0	-6
-5	0.3199	0.4048	0.2728	0	0	0	0	0	0	0	0.1875	0.2567	0.1186	0.1586	0	-5
-4	0.3737	0.4405	0.3118	0	0	0	0	0	0	0	0.2111	0.3427	0.1385	0.1851	0	-4
-3	0.4261	0.4792	0.3723	0.0083	0	0	0	0	0	0	0.2319	0.4261	0.1605	0.2146	0	-3
-2	0.4718	0.5313	0.4422	0.0347	0	0	0	0	0	0.0013	0.2708	0.4866	0.1849	0.2473	0	-2
-1	0.5874	0.558	0.5	0.0694	0	0	0	0	0	0.0108	0.3028	0.5323	0.2119	0.2833	0	-1
0	0.6492	0.6265	0.6089	0.1097	0	0	0	0	0	0.0228	0.3528	0.6062	0.2463	0.3294	0	0
1	0.8266	0.7128	0.8011	0.1778	0.0081	0	0	0	0.0028	0.0484	0.4278	0.6801	0.3055	0.4084	0	1
2	0.9664	0.7798	0.914	0.3153	0.0188	0	0	0	0.0083	0.1022	0.4903	0.7675	0.3619	0.4838	0	2
3	1	0.8795	0.9637	0.4472	0.0309	0	0	0	0.0222	0.1976	0.5486	0.9073	0.4144	0.554	0	3
4	1	0.939	0.9812	0.5708	0.0457	0.0028	0	0	0.0514	0.3091	0.6167	0.9691	0.4548	0.6078	0.0009	4
5	1	0.9583	0.9879	0.6597	0.0685	0.0097	0	0	0.0903	0.389						

Lämpötila	Kerroin	Suhde	Tunnit
-21	0	0	0
-20	0,0008	0,0008	7,008
-19	0,003	0,0022	19,272
-18	0,0056	0,0026	22,776
-17	0,008	0,0024	21,024
-16	0,0114	0,0034	29,784
-15	0,0177	0,0063	55,188
-14	0,0272	0,0095	83,22
-13	0,0344	0,0072	63,072
-12	0,0426	0,0082	71,832
-11	0,0485	0,0059	51,684
-10	0,0541	0,0056	49,056
-9	0,0597	0,0056	49,056
-8	0,0684	0,0087	76,212
-7	0,0826	0,0142	124,392
-6	0,0993	0,0167	146,292
-5	0,1186	0,0193	169,068
-4	0,1385	0,0199	174,324
-3	0,1605	0,022	192,72
-2	0,1849	0,0244	213,744
-1	0,2119	0,027	236,52
0	0,2463	0,0344	301,344
1	0,3055	0,0592	518,592
2	0,3619	0,0564	494,064
3	0,4144	0,0525	459,9
4	0,4548	0,0404	353,904
5	0,4868	0,032	280,32
6	0,5212	0,0344	301,344
7	0,553	0,0318	278,568
8	0,5872	0,0342	299,592
9	0,6192	0,032	280,32
10	0,6517	0,0325	284,7
11	0,6848	0,0331	289,956



12	0,7183	0,0335	293,46
13	0,7517	0,0334	292,584
14	0,7885	0,0368	322,368
15	0,8224	0,0339	296,964
16	0,8556	0,0332	290,832
17	0,8909	0,0353	309,228
18	0,9148	0,0239	209,364
19	0,9354	0,0206	180,456
20	0,9537	0,0183	160,308
21	0,9699	0,0162	141,912
22	0,9811	0,0112	98,112
23	0,9866	0,0055	48,18
24	0,9913	0,0047	41,172
25	0,9946	0,0033	28,908
26	0,9984	0,0038	33,288
27	0,9991	0,0007	6,132
28	0,9994	0,0003	2,628
29	1	0,0006	5,256

## Ohjeita laskentatyökalun käyttöön ja ohjelmointiin

TK 1											
Ulkolämpötila [°C]	LTO:n hyötysuhde [%]	Hyötysuhteen hälytysraja [%]	Jälkilämmityksen tehon tarve [kW]	Lämmityksen tila	Kulunut aika [h]	Energian kulutus [kWh]	Hinta [€]	Jälkilämmityksen tehon tarve, LTO riikki [kW]	Kulunut aika [h]	Energian kulutus [kWh]	Hinta [€]
-1											

Laskentatyökalu laskee lämmön talteenoton hyötysuhteen, sen hälytysrajan sekä jälkilämmityksen tarpeen ulkolämpötilan perusteella. Laskentatyökalun käyttö aloitetaan valitsemalla sen hetkinen ulkolämpötila. Ohjelmointivaiheessa tämä olisi järkevä yhdistää suoraan ulkolämpötilan mittaustulokseen. Lämpötilan valinnan jälkeen on sarakkeesta B3 katsottavissa sen hetkinen lämmön talteenoton hyötysuhde. Sarake C4 ilmoittaa hyötysuhteen hälytysrajan. Aluksi hälytysraja on asetettu 10 prosenttiyksikköä laskennallista hyötysuhdetta matalammaksi, mutta oikea asetus löytyy kokeilun jälkeen.

Sarakkeesta D4 on luettavissa tarvittava jälkilämmitysteho. Jos ulkolämpötila on riittävän korkea, ei jälkilämmitystä enää tarvita. Tällöin sarakkeessa E3 lukee ”Ei lämmitystarvetta”. Automaatiojärjestelmään olisi hyvä ohjelmoida lämmitystehon tarve nolaksi aina kun lämmitystehon tarve on nolla tai sitä pienempi.

Sarakkeessa E3 on kussakin tilanteessa kulunut aika. Ohjelmointivaiheessa aika olisi hyvä yhdistää automaatiojärjestelmän ajanottoon. Ohjelmoinnissa tulee kuitenkin huomata, että kaavassa aika täytyy ilmoittaa tunneissa. Jos automaatiojärjestelmän ajanotto laskee sekunteja, tulisi silloin kulunut aika merkitä esimerkiksi (1/3600)h. Tällöin murtoluvun osoittajana on kulunut aika sekunteina.

Sarakkeesta G3 on luettavissa kulutettu lämpöenergia ja sarakkeesta H3 tämän energiamäärän kustannus. Jotta kustannus olisi todellinen, tulee sarakkeen A8 kaukolämmön hinta muuttaa yrityksen lämpöenergiesopimusta vastaavaksi hinnaksi.

Punaisella pohjalla olevat laskentakaavat kertovat energian kulutuksesta ja kustannuksista lämmön talteenottolaitteen ollessa vikaantunut. Vikatilanteen

hyötysuhteeksi on valittu 20 %. Sarakkeessa J3 on vikatilanteen kulunut aika tunteina. Seuraavista sarakkeista on luettavissa lämpöenergian kulutus ja sen hinta.